

РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ ПО ВИВЧЕННЮ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕПЛОВИХ ХВИЛЬ

У роботі аналізується вивчення студентами хвильових процесів у вузівській лабораторії. Пропонується доповнити його дослідженням властивостей теплових хвиль. Представлена віртуальна лабораторна робота по вивченню властивостей теплових хвиль. Наведені типові завдання досліджень та аналіз очікуваних результатів.

The studying of wave processes by students in a teaching laboratory is under analysis in the work. It is proposed to add such studying by investigations of thermal wave properties. The virtual installation scheme for thermal wave properties studying is presented. There are given examples of the typical tasks for research and the analysis of expected results.

Постановка проблеми. Одним із фундаментальних понять у сучасній фізиці є поняття коливальних процесів та розповсюдження їх у просторі у вигляді хвиль. Поряд з елементарними порціями речовини – атомами і молекулами в курсі сучасної фізики впевнено отримали місце кванти механічних коливань – фонони, електромагнітних – фотони, спінових – магнони і т.д. Більше того, при вивченні багатьох явищ мікросвіту доводиться розглядати мікрочастинки не як тіла, як кванти хвиль де Бройля. Тому важливим є формування у майбутніх вчителів фізики та природничих дисциплін розуміння динаміки хвильових процесів, універсальності законів коливальних явищ у природі.

Аналіз попередніх досліджень. Вивченню хвильових процесів приділяється велика увага в курсі фізики. Виконання відповідних лабораторних робіт заплановано при вивченні розділів “Механіка”, “Електрика і магнетизм”, “Оптика”, “Атомна та ядерна фізика” [1].

На жаль, при всій різноманітності досліджуваних властивостей коливань та явищ, що супроводжують їх розповсюдження (інтерференція, дифракція, поляризація, затухання, розсіяння, дисперсія, закони фотоефекту, дискретність спектрів атомів і молекул і т.д.) в лабораторних роботах з фізики традиційно працюють тільки з двома видами хвиль: механічними та електромагнітними [2].

Виділення невирішених раніше частин проблеми. Водночас поза межами лабораторного практикуму залишаються інші типи хвиль і зокрема такий цікавий вид їх як теплові. Теплові хвилі виникають при модульованому в часі нагріванні середовища. Результуючі коливання температури, що поширюються від місця нагріву, набули назву теплових або температурних хвиль [3]. Особливістю цих хвиль, на відміну від акустичних, є сильне затухання (порядку 500 разів на довжині хвилі λ_T , а, також залежність λ_T , а, значить і глибини затухання l_T від частоти модуляції джерела нагріву

$$\lambda_T = 2\pi l_T = (2\chi/\omega \text{cp})^{1/2} \quad (1)$$

Тут ρ , χ – питомі теплосмність і густина, теплопровідність матеріалу, ω – циклічна частота модуляції джерела нагрівання. Особливостями поведінки теплових хвиль можна було б пояснити таке відоме із природознавства явище, як незалежність температури земного ґрунту уже на глибині 1 метр від добових коливань температури його поверхні, зумовлених нагріванням вдень і охолодженням уночі. Аналогічні коливання нагрітості земної поверхні, зумовлені зміною пір року, не впливають на температуру Землі вже на глибині 20 м [3]. Глибше температура Землі зовсім не залежить від теплових коливань на її поверхні.

Викладення даного матеріалу повинно роз’яснити майбутнім фізикам, географам, природознавцям відомий їм факт, що сезонні коливання температури земної поверхні проникають тільки на досить незначні глибини.

Сильне затухання теплових хвиль дозволяє також використовувати їх як унікальний інструмент при пошаровій діагностиці оптично непрозорих невеликих за розмірами об'єктів, наприклад, виробів мікроелектроніки [4]. В області модульованого нагріву середовища створюється своєрідний "тепловий зонд", переміщаючи який можна досліджувати внутрішню будову зразка, виявляючи місця неоднорідності його теплових властивостей (тріщини, пустоти, фазові границі і т.д.). Причому розмірами зонду, а також глибиною зондування можна керувати, змінюючи частоту модуляції джерела нагріву.

Оскільки через сильне затухання детектувати безпосередньо теплові хвилі важко [5], їх реєструють за супутніми явищами: генерованими за рахунок теплового розширення механічними коливаннями, надлишковим тепловим випромінюванням, зміні показників заломлення і відбивання світла і т.д. [6-7].

Формулювання мети статті. В даній роботі пропонується доповнити програму курсу загальної фізики вивченням властивостей теплових хвиль, зокрема шляхом виконання відповідної роботи лабораторного практикуму. Окрім збільшення обсягу знань студентів про хвильові процеси, вивчення даного типу хвиль дозволило б поліпшити викладання розділу "Термодинаміка та молекулярна фізика", у якому експериментальне дослідження хвильових процесів зводиться лише до використання звукових хвиль при вимірюванні теплоємності [2].

Виклад основного матеріалу дослідження. При вивченні теплових хвиль студенти мають можливість спиратися на раніше засвоєну у розділі «Механіка» інформацію:

1. Фізика хвильового процесу.
2. Основні характеристики хвилі: довжина хвилі, амплітуда, період, частота, фаза, рівняння хвильового фронту, фазова та групова швидкості хвилі.
3. Відбивання, інтерференція та дифракція хвиль.
4. Енергетичні характеристики хвильового процесу.

В роботі вибрано найбільш розповсюджений акустичний варіант детектування термохвильового сигналу, коли прикріплений до пластини п'єзодатчик реєструє звук, створений за рахунок теплового розширення в області проходження теплової хвилі – фототермоакустичний (ФТА) ефект.

Хоча метод п'єзодатчика і є одним з найпростіших у фототермоакустиці, однак на практиці для отримання прийняттого рівня акустичного сигналу доводиться використовувати достатньо потужні лазери та високочутливу вимірювальну апаратуру. Не дуже просто також здійснити амплітудну модуляцію випромінювання лазера з можливістю змінювати її в необхідному діапазоні частот. Далеко не кожен навчальний заклад може дозволити собі створити таку установку в навчальній лабораторії. Приємним винятком є фізичний факультет Київського національного університету, де така установка створена і використовується в навчальному процесі [8].

В даній статті пропонується використання віртуальної лабораторної роботи, створеної на основі програми Delphi 7, за допомогою якої можна було б моделювати експеримент по вивченню властивостей теплових хвиль. В роботі вивчається сильнозатухаючий характер теплових хвиль, залежність глибини затухання від частоти та можливості термохвильової діагностики дефектів в оптично непрозорих об'єктах.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ХВИЛЬ

Мета роботи: Вивчити властивості теплових хвиль. Дослідити сильнозатухаючий характер теплових хвиль і залежність їх довжини та глибини затухання від частоти модуляції джерела нагріву. Ознайомитись з можливостями термохвильової діагностики дефектів в оптично непрозорих об'єктах.

1. Теоретичні відомості.

Теплові хвилі виникають при модульованому в часі нагріванні зразка. Результируючі коливання температури, що поширюються від місця нагріву, набули назву теплових або температурних хвиль.

Щоб отримати якісне уявлення про механізм генерування термохвильового сигналу в конденсованому середовищі, розглянемо наступну найпростішу одновимірну модель. Нехай пластина ізотропного твердого тіла товщиною d (Рис.1) рівномірно освітлюється в площині $x=0$ світлом, модульованим за інтенсивністю по закону:

$$I = I_0(1 + \cos(\omega t))/2 \quad (1)$$

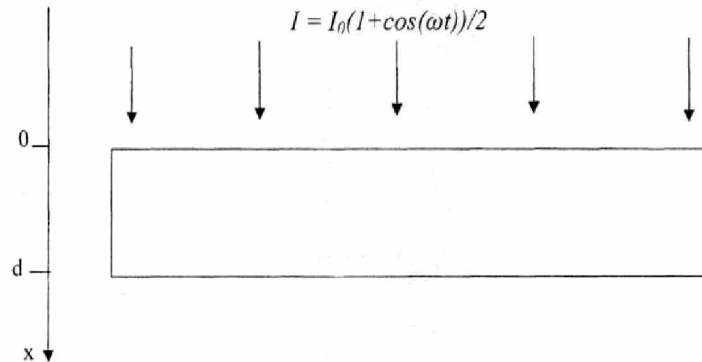


Рис.1

Для спрощення розрахунків розв'яжемо задачу у комплексному вигляді. Припустивши, що вся поглинута світлова енергія перетворюється в теплову, можемо записати рівняння теплопровідності:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \alpha \frac{I_0}{2} e^{-\alpha x} e^{i\omega t}, \quad (2)$$

де c , ρ , χ і α - питомі теплоємність і густина, теплопровідність і коефіцієнт оптичного поглинання матеріалу, T - модульована температура зразка.

Відкинувши із фізичних міркувань доданок із зростаючою вглиб зразка температурою і нехтуючи тепловідводом в навколишнє середовище, отримуємо температуру на глибині x у комплексному вигляді :

$$T(x,t) = \frac{\alpha I_0}{2\chi(\eta^2 - \alpha^2)} (e^{-\alpha x} e^{i\omega t} - \frac{\alpha}{\eta} e^{-x/l} e^{i(\omega t - x/l)}), \quad (3)$$

$$\text{де } A_1 = \frac{\alpha I_0}{2\chi(\eta^2 - \alpha^2)}; \quad A_3 = -\frac{\alpha}{\eta} A_1; \quad \eta = (1+i)(\omega c\rho/2\chi)^{1/2} = \frac{(1+i)}{l}; \quad l = (2\chi/\omega c\rho)^{1/2}.$$

Перший доданок описує коливання температури, зумовлені поглинанням світла в даній точці, а другий відповідає теплу, що надійшло від інших областей середовища і описує власне теплову хвилю. Довжина теплової дифузії $l = (2\chi/\omega c\rho)^{1/2}$ відповідає глибині затухання хвилі в e разів. Із рівняння поверхні рівної фази $\varphi = \omega t - x/l$ можна отримати, що швидкість хвильового фронту $v = \omega l = (2\omega\chi/c\rho)^{1/2}$ пропорційна $\omega^{1/2}$. Довжина хвилі $\lambda = vT = 2\pi l$.

Бачимо, що теплові хвилі мають принципові відмінності від акустичних та електромагнітних хвиль, оскільки, по-перше, швидкість хвильового фронту залежить від частоти модуляції і, по-друге, в самому записі хвильового рівняння закладено сильне затухання амплітуди хвилі з глибиною:

$$T(x, t) = \frac{\alpha^2 I_0}{2 \chi \eta (\eta^2 - \alpha^2)} e^{-\chi t} \quad (4)$$

Для твердих тіл глибина затухання теплових хвиль сягає від 1 мм для частот порядку 10 Гц до 1 мкм для частот порядку 10 МГц. . Відповідні величини для алюмінію, кремнію та германію наведені в табл.1.

Табл.1.

Матеріал	Густина, кг/м ³	Питома теплоємність, кДж/кгК	Теплопровідність, Дж/м·с К	Довжина теплової дифузії $l = (2\chi/\omega \text{cp})^{1/2}$, мкм на різних частотах модуляції ($\nu = \omega/2\pi$)				
				$\nu=10$ Гц	$\nu=10^2$ Гц	$\nu=10^3$ Гц	$\nu=10^4$ Гц	$\nu=10^5$ Гц
Al	2700	0,88	2,01	1870	590	187	59	18,7
Si	2330	0,70	1,89	1900	610	190	61	19,0
Ge	5320	0,70	0,71	3670	1160	367	116	36,7

Вказані властивості теплових хвиль дозволяють використовувати їх як унікальний інструмент при пошаровій діагностиці оптично непрозорих невеликих за розмірами об'єктів, наприклад, виробів мікроелектроніки. В області модульованого нагріву середовища створюється своєрідний "тепловий зонд", переміщаючи який можна досліджувати внутрішню будову зразка, виявляючи місця неоднорідності його теплових властивостей (тріщини, порожнини, фазові границі і т.д.). Причому розмірами зонду, а також глибиною зондування можна керувати, змінюючи частоту модуляції джерела нагріву.

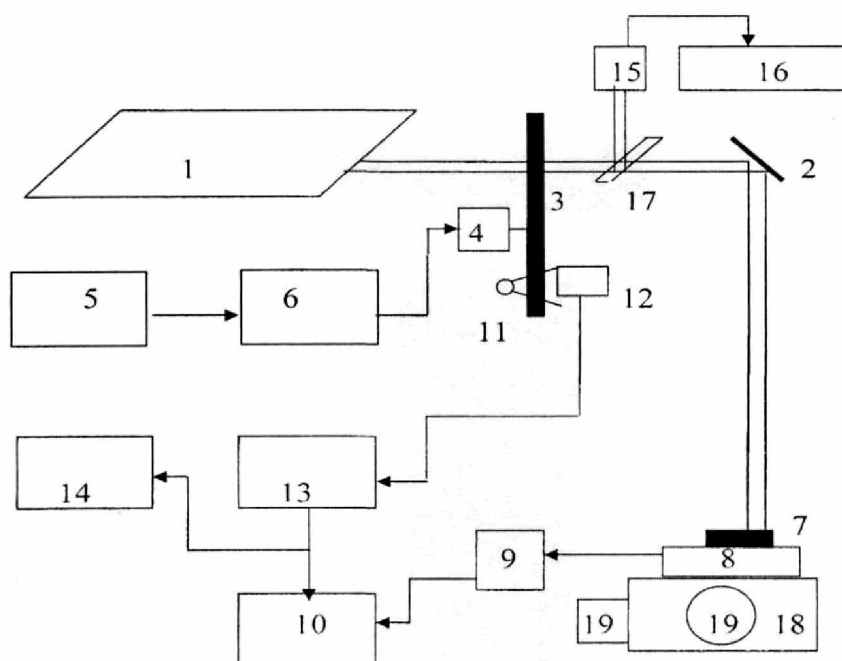
Водночас, сильне затухання робить практично неможливим безпосередню ресстрацію теплових хвиль (наприклад піроелектричними датчиками), тому найчастіше детектують акустичні хвилі, що виникають всередині зразка за рахунок теплового розширення в області проходження теплової хвилі фототермоакустичний (ФТА) ефект. Слід зазначити, що, оскільки в звуковому діапазоні акустичні хвилі на декілька порядків довші за теплові і за характерні розміри неоднорідностей, на яких розсіюються теплові хвилі, вони в даному випадку слугують лише пасивними носіями інформації, отриманої від хвиль теплових.

2. Обладнання.

Розглянемо блок-схему типової експериментальної установки (Рис.2). Генерація теплових хвиль здійснюється за рахунок нагрівання поверхні зразка променем лазера неперервної дії. Для амплітудної модуляції випромінювання лазера направляється на диск 3 з отворами, який обертається за допомогою двигуна 4. Промінь збуджуючого випромінювання за допомогою дзеркала 2 направляється на об'єкт дослідження 7, що знаходиться в акустичному контакті з датчиком 8 (п'єзоелектричний перетворювач).

На практиці при використанні лазерів невеликої потужності рівень корисного сигналу п'єзодатчика зрівняний за величиною з рівнем сигналу, що створюють навколишні акустичні шуми. Для виділення корисного сигналу із шумів застосовується метод синхронного детектування. В цьому методі корисний сигнал разом із шумами подається на основний вхід синхронного детектора, а опорний, модульований тотожно падаючому на зразок оптичному променю, – на допоміжний вхід. В результаті із усієї поданої напруги виділяється і підсилюється лише сигнал, що по формі збігається з опорним.

Опорний сигнал формується оптичною системою, яка складається з лампи розжарення 11 і фотодіода 12. Модульована напруга з фотодіода через підсилювач 13 потрапляє на вхід опорного сигналу підсилювача з синхронним детектором 10. Частина сигналу з виходу підсилювача 13 відгалужується на частотомір 14 для контролю частоти модуляції. Інтенсивність збуджуючого лазерного випромінювання контролюється системою, що складається із фотодіода 15 і цифрового вольтметра 16.



- 1 – газовий лазер (ЛГ-38 або ЛГ-62);
 2 – дзеркало;
 3 – диск модулятора;
 4 – електродвигун Г-31;
 5 – генератор ГЗ-34;
 6 – Підсилювач потужності У-100;
 7 – д осліджуванй зразок;
 8 – п'єзoeлектричний перетворювач (кераміка ЦТС-19);
 9 – попередній підсилювач УНІПАН-233-6;
 10 – синхронний підсилювач УНІПАН-232;

- 11 – лампа розжарювання;
 12,15-фотодіоди;
 13-підсилювач У2-8;
 14-частотомір ЧЗ-38;
 16 цифровий вольтметр В7-23;
 17-скляна пластинка;
 18- двокоординатний столик;
 19-мікрометричні гвинти;

Рис. 2

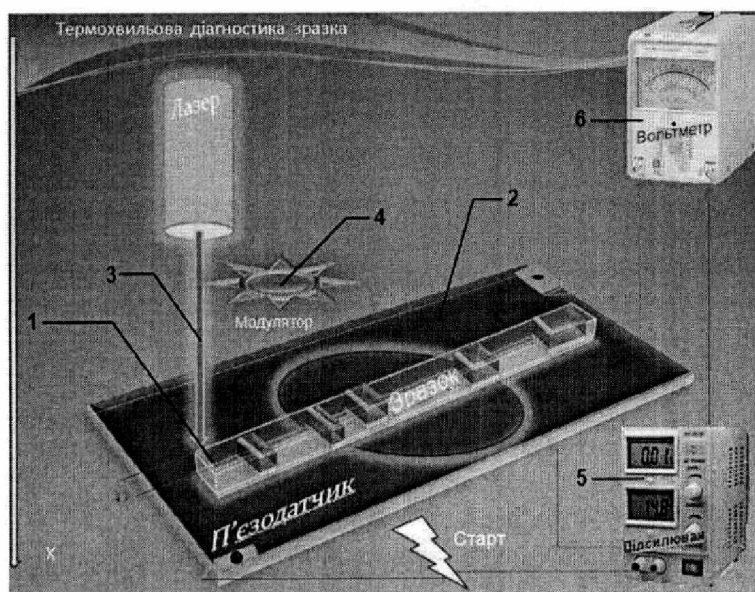


Рис. 3.

П'єзодатчик 8 розміщується на двокоординатному столику 18, що дозволяє здійснювати переміщення зразка відносно нерухомого лазерного променя з допомогою мікрометричних гвинтів 19. Сигнал п'єзодатчика через попередній підсилювач 9 потрапляє на основний вхід синхронного підсилювача 10. Досліджувані зразки (рис.4) являють собою пластинки із різних матеріалів (алюміній, кремній, германій), всередині яких на різних глибинах створені порожнини.

Сама ж поверхня зразка полірована для досягнення максимальної її однорідності. Робота змодельована на основі програми Delphi 7. Після запуску лабораторної роботи з'являється заставка (рис.3), на якій зображена спрощена схема установки.

Досліджуваний зразок (1) приклеєний до датчика акустичного сигналу(2). На поверхню зразка направляється лазерний промінь (3), модульований за інтенсивністю механічним переривачем (4). Лазерний промінь здійснює переміщення відносно нерухомого п'єзоелектричного перетворювача. Сигнал датчика після підсилювача (5) вимірюється вольтметром (6).

3. Хід роботи

1. Запустити програму, після чого на екрані з'являється заставка (рис.3), на якій зображена спрощена схема установки. Ознайомитись з основними елементами експериментальної установки.

2. Натиснувши клавішу Enter викликати інтерфейс користувача(Рис. 4), де зробити відповідні налаштування:

- матеріал (Al, Si, Ge) ;
- структуру зразка (№ 1, № 2, № 3) ;
- частоту сканування (попередньо) в діапазоні $10^1 - 10^5$ Гц ;

Примітка: якщо хоча б одна форма не буде обрана – не розпочнеться сканування!!!

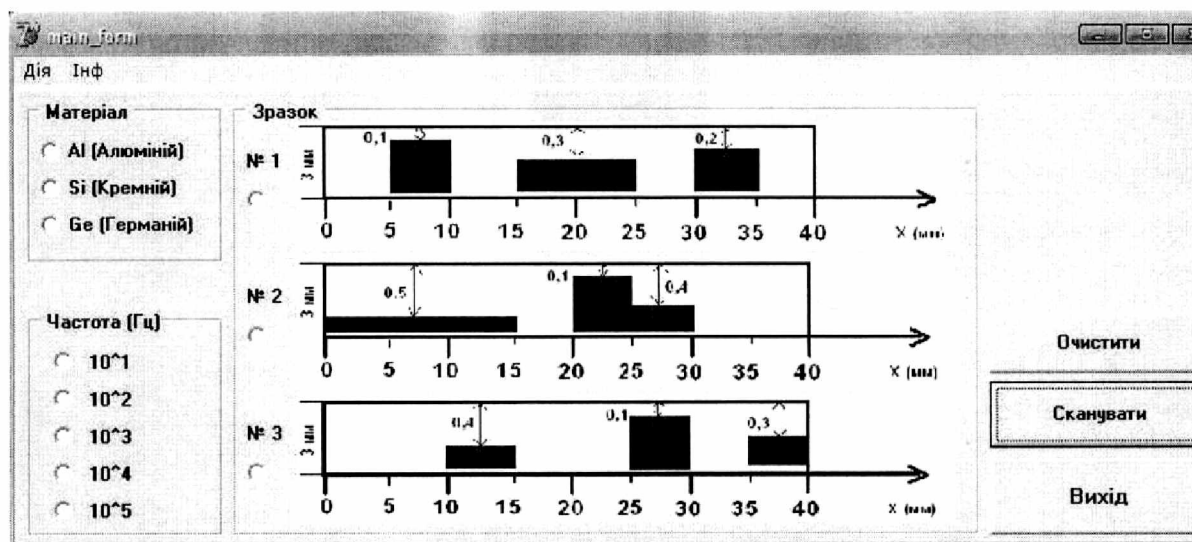


Рис.4.

3. Натиснути на кнопку „Сканувати”. В динамічному режимі з'являється установка (Рис.3) і відбувається сканування обраного зразка.

4. Сканування провести 5 разів змінюючи частоту модуляції.

5. Зробити висновок про залежність візуалізації дефектів від частоти модуляції нагрівання поверхні.

6. Із аналізу топограм розрахувати на основі даних таблиці 1 глибини залягання підповерхневих дефектів в зразках, спростивши формулу (4) на випадок сильного поглинання світла ($\alpha \gg |\eta|$).

$$T(x,t) = \frac{I_0}{2\chi\eta^3} e^{-x/\eta}. \quad (5)$$

і врахувавши, що амплітуда фототермоакустичного (ФТА) сигналу пропорційна градієнту температури.

Як приклад на рис. 5 наведені отримані за допомогою описаної програми термохвильові топограми алюмінієвого зразка №1 на двох різних частотах модуляції. Із топограми, знятої на частоті 100 Гц (рис. 5 (а)) видно, що сигнал зростає там, де лазерний промінь зондує області з погіршеними умовами відводу тепла (підповерхнева порожнеча). Топограма на частоті 10кГц для того ж зразка наведена на рис.5 (б). В цьому випадку глибина проникнення теплової хвилі менше від глибини залягання дефектів. З малюнку видно, що сигнал від всіх областей практично однаковий, а значить “тепловий зонд” майже не досягає дефектної області і “не відчуває” ніяких порушень структури зразка.

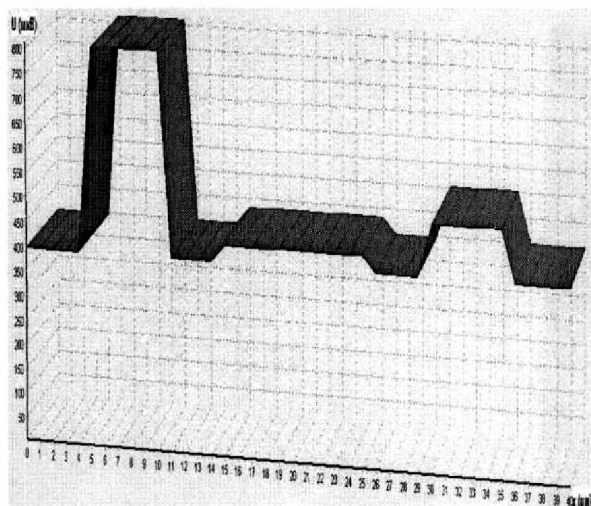


Рис. 5 (а), частота модуляції 100 Гц

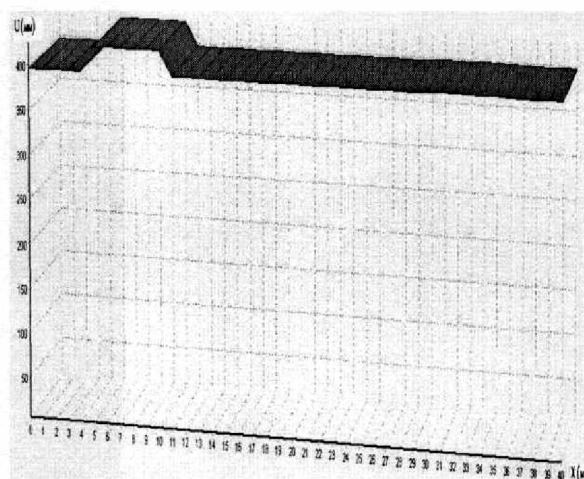


Рис. 5 (б), частота модуляції 1000 Гц

Порівняємо на основі даних Рис. 5 (а) глибини залягання лівого і центрального підповерхневих дефектів.

Оскільки амплітуда ФТА сигналу пропорційна градієнту температури, то на основі формули (5) запишемо для нього:

$$F(x) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{I_0}{2\chi\eta^3} e^{-x/l} \right) = \frac{I_0}{2\chi\eta^3 l} e^{-x/l} \approx A e^{-x/l}.$$

$$\text{Тоді відношення сигналів від двох дефектів} \quad \frac{F_2}{F_1} = e^{(x_1 - x_2)/l} \Rightarrow x_1 - x_2 = l \cdot \ln \frac{F_2}{F_1}.$$

Взявши із табл. 1 для алюмінія на частоті 100 Гц: $l=0,59$ мм і вимірявши $\frac{F_2}{F_1} = \frac{500}{400} = 1,25$, отримаємо $x_1 - x_2 = 0,59 \ln 1,25 \approx 0,13$ мм, що приблизно відповідає параметрам зразка.

Висновки. Виконання запропонованих у даній роботі досліджень дозволить студентам глибше вивчити особливості хвильових процесів та краще осягнути універсальність коливальних процесів в природі на прикладі теплових хвиль, а також закріпити знання розділу «Термодинаміка».

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Програми для фізико-математичних факультетів педінститутів. Зб. № 2. За заг ред. М.І.Шкіля та Г.П.Гришенка. – К.: РОВО “Укрвузполіграф”, 1992 – 144 с.
2. Лабораторный практикум по общей физике (под ред. Е.М.Гершензона, Н.Н.Малова. – М.: Просвещение, 1985. – 351 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2 – М.: Наука, 1975. – 551 с.

4. Rosencwaig A. Thermal wave microscopy with photoacoustics // J.Appl.Phys. – 1980. – Vol.51, №4. – P.2210-2211.
5. Baumann T., Dacol F. and Melcher R.L. Transmission thermal wave microscopy with pyroelectric detection // Appl.Phys.Lett – 1983. – Vol.43, №1. – P.71-73.
6. Жаров В.П., Летохов В.С. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия– М.: Наука, 1975. – 320 с.
7. Сверхчувствительная лазерная спектроскопия – под ред. Д.Клайджера– М.: Мир, 1986. – 519 с.
8. Волчанський О.В., Кузьмич А.Г. Стенд для вивчення властивостей теплових хвиль за допомогою термоелектричного ефекту // Наукові записки Кіровоградського педуніверситету, 2008, Серія: Педагогічні науки. Вип.77, Ч.1., С.311-315.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

Волчанський Олег Володимирович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики та методики її викладання Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка.

Наукові інтереси: фототермічні та фотоакустичні явища в напівпровідниках, методика викладання фізики, реформування вищої освіти України.